

Conception et construction d'un four électrique de désaimantation des roches

Seguin, M.K.

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 24, 1973/74,
S.61-77



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Conception et construction d'un four électrique de désaimantation des roches

par **M. K. Seguin**

Département de Géologie Université Laval
Québec G 1 K 7 P 4 Canada

Vorgelegt von André **Cailleux**

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden die Entwicklung, die Konstruktion und die Eigenschaften, sowie die Betriebsergebnisse eines elektrischen Ofens von 12,7 cm inneren Durchmessers und 62 cm Länge behandelt. Die Achse des Ofens ist horizontal. Der Ofen kann ein Dutzend zylindrischer Proben vom Durchmesser 2,5 cm und der Höhe 2,1 cm oder Würfel einer Kantenlänge von 2,1 cm aufnehmen. Diese Proben sind einem schwachen magnetischen Feld mit der Intensität einiger Gamma ausgesetzt. Die Temperatur des Ofens wird automatisch geregelt; der Einfluß des magnetischen Feldes wird durch ein System Helmholtz-scher Spulen ausgeschaltet. Es werden die verschiedenen nicht-magnetischen Materialien die beim Bau des Ofens verwendet wurden angegeben und die Methoden der thermischen Entmagnetisierung in den palaeomagnetischen Studien beschrieben.

Résumé

Cet article traite de la conception, de la construction, des caractéristiques et du fonctionnement d'un four électrique de 12,7 cm de diamètre et de 62 cm de longueur dont l'axe est orienté suivant l'horizontale. Ce four peut contenir une douzaine d'échantillons cylindriques (diamètre: 2,5 cm, hauteur: 2,2 cm) ou cubiques (côté: 2,5 cm) dans un champ magnétique de faible intensité dont l'ordre de grandeur est d'environ une dizaine de gammas. La température du four est commandée automatiquement et le champ magnétique terrestre est éliminé grâce à un système de bobines d'Helmholtz. On fait la description des divers matériaux non-magnétiques qui contribuent à la construction du four et on discute de l'utilisation d'un tel four ainsi que des techniques de désaimantation thermique dans les études paléomagnétiques.

Abstract

This paper deals with the conception, construction, characteristics and performance of an electric oven having 12,7 cm in diameter, 62 cm in length and the axis of which is oriented horizontally. The oven can accomodate a dozen of cylindrical (diameter: 7,5 cm, length: 2,2 cm) or cubic width: 2,5 cm) specimens in a magnetic field of very weak intensity (of the order of 0 to 20 gammas). The temperature of the oven is automatically controlled and the earth's magnetic field is almost completely cancelled with a system of Helmholtz coils. The description of the different non-magnetic materials used in the construction of the oven is incorporated in the paper and the utilization of the oven as well as the techniques used in thermal demagnetization for paleomagnetic studies are discussed in detail.

Introduction

Comme on le sait, la désaimantation thermique des roches est une technique de base pour les recherches archéomagnétiques et paléomagnétiques. Elle a pour but principal d'identifier les aimantations contenues dans la roche et d'isoler une aimantation qui peut donner des renseignements sur la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre ancien. Elle peut aussi être utile en géophysique appliquée et en physique de la terre dans l'étude de l'histoire géologique de certains dépôts minéralisés d'intérêt économique (Schwarz, 1966) ou de la dérive des continents (Runcorn, 1962; Irving, 1964). Dans ce genre d'études, il faut souvent éliminer des échantillons rocheux toute aimantation qui n'est pas d'intérêt principal. Cette élimination des composantes secondaires se fait le plus couramment en soumettant les échantillons à une désaimantation thermique. Le but principal de cet article est la description d'un four électrique utilisé pour la désaimantation thermique et du moyen de déterminer l'intensité et la direction d'un champ magnétique fossile.

Dans une première partie (I), on va aborder quelques considérations d'ordre théorique relatives à l'acquisition de l'aimantation thermorémanente et rassembler des explications essentielles concernant l'acquisition de cette mémoire magnétique qui permet d'étudier l'évaluation du champ magnétique terrestre dans le passé géologique. Dans une seconde partie (II), on décrira la construction du four électrique et étudiera les exigences qu'il doit remplir; une troisième partie (III) contiendra l'élaboration d'une technique d'utilisation et les recommandations indispensables à l'acquisition de résultats valables à partir de données d'aimantation rémanente naturelle.

I. Etude de l'aimantation thermorémanente naturelle

Le traitement thermique des roches a permis de découvrir certaines lois d'aimantation des roches. Entre autres choses, on a observé que les roches possè-

dent une mémoire magnétique, c'est-à-dire qu'elles peuvent acquérir une aimantation thermorémanente partielle (A. T. R. P.) d'intensité proportionnelle à celle du champ magnétique ambiant et d'orientation parallèle à ce champ. En plus de ces caractéristiques, l'A. T. R. P. résistera à tout réchauffement inférieur à la température (Θ) d'acquisition de cette aimantation, mais pourra être remplacée totalement ou en partie par une nouvelle A. T. R. P. lors d'un réchauffement à une température égale ou supérieure à Θ et un refroidissement subséquent dans un champ ambiant quelconque.

Néel (1955) a fait l'étude théorique des mécanismes d'acquisition de l'aimantation.

a) Procédé d'acquisition de l'A. T. R.

Néel (1955) donne des explications relatives à ce procédé en se basant sur le fait que les grains qui contiennent la mémoire magnétique se divisent en deux groupes à une température Θ . Un premier groupe a un diamètre plus grand que le diamètre critique (d_{Θ}) et garde l'orientation initiale du moment magnétique pendant un temps indéfini; l'action d'un champ magnétique (\vec{T}) ne peut alors vaincre les forces coercitives (\vec{H}). Dans le second groupe, les grains ayant un diamètre plus petit que d_{Θ} vont tendre vers l'équilibre, i. e. qu'ils vont s'orienter soit dans la direction du champ \vec{T} , soit dans une direction anti-parallèle.

La température Θ est la température de blocage où le diamètre de certains grains devient critique, c'est-à-dire que le temps de retour de ces grains à une fonction d'équilibre devient très grand. La température de blocage peut varier du point de Curie (Θ_c) pour les gros grains au zéro absolu pour de petits grains. On peut maintenant expliquer l'acquisition d'une aimantation thermorémanente. Soit un échantillon chauffé à la température de Curie (Θ_c) et refroidi jusqu'à la température ambiante. Pour une température donnée, certains grains ont un diamètre critique et ils acquièrent un moment magnétique, ils conservent ce moment parce que le temps de retour à une position d'équilibre est devenu très grand. Le moment magnétique obtenu de cette façon n'est pas affecté par la faible variation de champ. Si l'on réchauffe à nouveau l'échantillon en champ nul, au début les grains gardent leur moment car ils ont une mémoire magnétique; puis les grains ayant une température de blocage Θ , vont perdre leur moment à cette température Θ . Grâce à la relativement grande stabilité d'aimantation, on peut espérer pouvoir retracer ainsi l'évolution de l'aimantation d'une roche.

Néel (1955) a d'abord expliqué cette aimantation en considérant l'analyse de grains si fins qu'ils formeraient chacun un seul domaine magnétique. La deuxième interprétation que Néel donne concerne le cas de gros grains susceptibles d'obtenir une aimantation par déplacement de parois. Seguin (1971) explique la raison de la formation de ces parois (interprétation quantique de l'aimantation);

pour lui, elles représentent une frontière entre les domaines d'électrons de spins opposés. Ce mur s'établit graduellement par une rotation progressive de 180° des spins des électrons, ce qui permet une énergie de frontière moins grande. L'épaisseur du mur résulte d'un compromis entre l'énergie d'interaction et d'anisotropie. L'acquisition de l'A. T. R. s'effectue grâce à un déplacement plus ou moins grand de cette frontière. Soit la distance possible de déplacement (l), le mouvement de cette paroi est obstrué par une répartition sur toute la longueur (l) de barrières ayant des niveaux d'énergie différents pour chacune d'elles. Si un tel arrangement est placé dans un champ \vec{T} , il est possible qu'il se produise un déplacement de cette paroi si le champ \vec{T} peut vaincre l'opposition des barrières.

Si l'on considère l'aimantation acquise à partir du point de Curie jusqu'à la température Θ dans un champ \vec{T} , on peut classer les barrières en deux groupes, le premier (A) comprenant toutes celles que l'on peut franchir grâce à l'agitation thermique au-dessus de Θ , et le second (B) qui renferme toutes les autres. Si la roche ne possède aucune aimantation, le mur se situe au centre C de la longueur (l) du système **A DD' C B**. En appliquant un champ \vec{T} au point de Curie Θ_c à la température de la pièce, le mur va franchir toutes les barrières et se rendre à l'extrémité A de sorte que la distance AB se trouve bloquée à la température de la pièce. La partie AC représente l'aimantation thermorémanente totale. Si l'action du champ \vec{T} se produit seulement entre le point de Curie (Θ_c) et la température Θ , la paroi en présence du champ va franchir toutes les barrières jusqu'à A et lorsqu'on enlève le champ, on observera un retour en arrière jusqu'au point où celles du type B bloquent son passage. L'aimantation thermorémanente partielle correspond à la distance CD. De la même façon, on observera une aimantation correspondante à la distance CD' si le champ est appliqué à une température Θ égale à la température ambiante. La somme de CD et CD' correspond à l'aimantation totale AC. On comprend alors pourquoi il est possible de retrouver la direction et l'intensité d'un champ \vec{T} qui a donné une aimantation partielle. La roche a la propriété de retenir à quelle température chaque A. T. R. P. a été acquise et on peut alors retracer l'évolution de l'aimantation en soumettant la roche à des recuits progressifs suivi chacun d'un refroidissement en champ magnétique connu. L'extraction de cette composante d'aimantation s'effectue plus facilement si le champ ambiant est nul car en soustrayant les aimantations parasites (e. g. aimantation visqueuse dite de traînage) de la somme vectorielle (aimantation totale) par traitement thermique en champ nul, on peut isoler et identifier le vecteur d'une aimantation inconnue qui pourra donner des renseignements sur la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre ancien.

II. Construction d'un four électrique de désaimantation

La conception d'un four pour la désaimantation thermique doit répondre à certaines exigences:

1. Avoir un refroidissement rapide qui permet d'éviter les changements chimiques qui pourraient prendre place si l'on soumettait l'échantillon à une température élevée durant une longue période de temps.
2. Etre muni d'un système permettant d'opérer en champ nul, ce qui rend plus facile l'utilisation de ce dernier.
3. Etre constitué de matériaux non magnétiques.
4. Pouvoir atteindre une température d'au moins 700°C , ce qui est légèrement supérieur au point de Curie de l'hématite ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\Theta_c = 680^{\circ}\text{C}$) et de la maghémite ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\Theta_c = 545^{\circ} \rightarrow 675^{\circ}\text{C}$).
5. Posséder une bonne uniformité de température à l'intérieur.
6. Etre précis en température absolue.
7. Pouvoir garder la température et le champ constants durant de longues durées.
8. Etre assez sûr pour exiger peu de surveillance et avoir une capacité notable afin de désaimanter plusieurs échantillons tout en les espaçant suffisamment pour prévenir les interactions magnétiques (1 à 2 cm de distance de séparation suivant l'intensité de A. N. R. des échantillons qui sont des cylindres ou cubes d'environ 10 cm^3).

On donnera donc une description de ce four et on traitera des conditions expérimentales qui doivent être respectées afin de s'approcher le plus possible des conditions idéales et d'obtenir de meilleurs résultats.

a) Description du four

Le four (figures 1 et 2) est du type immobile, c'est-à-dire que la seule partie mobile est le bonnet qui permet d'en fermer l'entrée. Ce type de four permet un taux de refroidissement moins rapide qu'un four de conception mobile (Irving, Robertson, Stott, Tarling et Ward, 1961) qui peut être déplacé pour laisser les échantillons en place sur des tablettes. On n'a pu adopter ce deuxième type de four mobile parce qu'il demande trop d'espace dans nos laboratoires et une plus grande quantité de ressources. Il est quand même possible d'obtenir d'excellents résultats à l'aide d'un four immobile à condition de laisser une plus grande distance entre les échantillons lors du chauffage ou d'insuffler un jet d'air froid au moyen d'une pompe durant la période de refroidissement.

L'intérieur du four est constitué d'un cylindre d'alumine de 12,7 cm de diamètre, 62 cm de longueur, 1 cm d'épaisseur et fermé à l'une des extrémités. Le fil de chauffage a été placé autour du tube et cimenté en 50 rangées, espacées de 0,86 cm et parallèles à l'axe du four selon la méthode de Thellier (1959). Il faut que le nombre de rangées soit pair afin que le courant de chauffage qui circule dans une rangée revienne par la rangée adjacente et qu'ainsi des champs

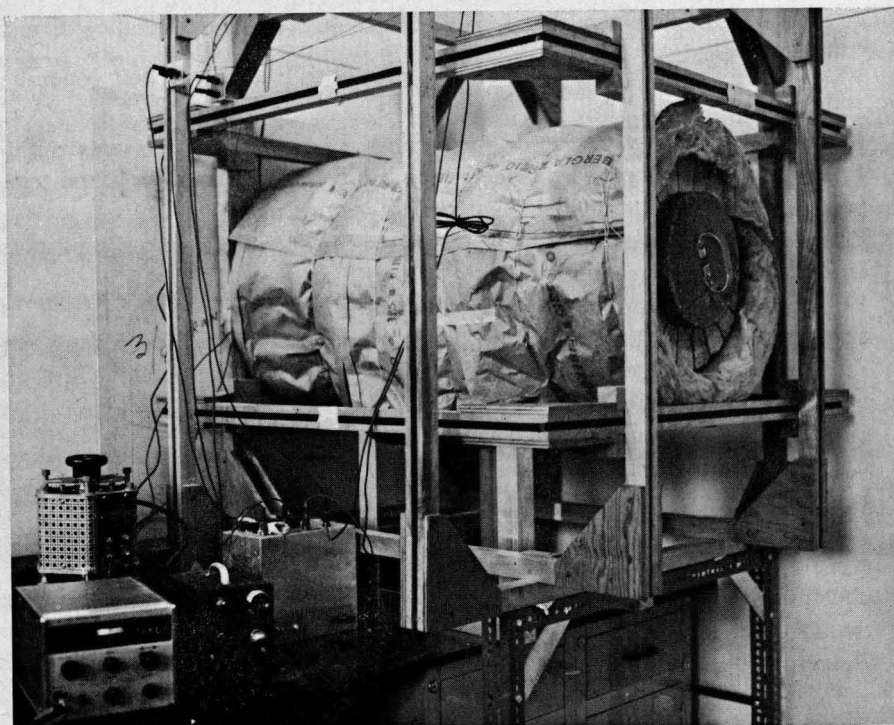


Figure 1
Photographie du four électrique

magnétiques égaux et opposés tendent à s'annuler mutuellement. Un deuxième tube d'alumine ayant un diamètre interne de 15,3 cm et de 1 cm d'épaisseur entoure l'élément de chauffage afin de maintenir les rangées en place. Les extrémités du double tube sont scellées avec du ciment afin d'éviter tout contact avec l'air environnant et de prolonger ainsi la durée d'action du calorifère. Les briques réfractaires de 11,5 cm d'épaisseur, de 23 cm de longueur et de section circulaire entourent le double tube. On a utilisé quatre rangées de ces briques, ce qui donne une longueur totale de 92,5 cm et permet ainsi d'isoler chaque extrémité à l'aide de ciment isolant; le bonnet a été fabriqué avec ce même ciment (Lambert, 1973).

On a recouvert la paroi externe du four d'un mince feuillet d'aluminium dont la surface très brillante réfléchit sur la région centrale une fraction importante de la chaleur qui autrement serait dissipée vers l'extérieur par le four. Cette enveloppe d'aluminium est à son tour enrobée d'une épaisse couche de laine de verre qui sert d'isolant calorifique entre la paroi externe du four et l'atmosphère ambiante.

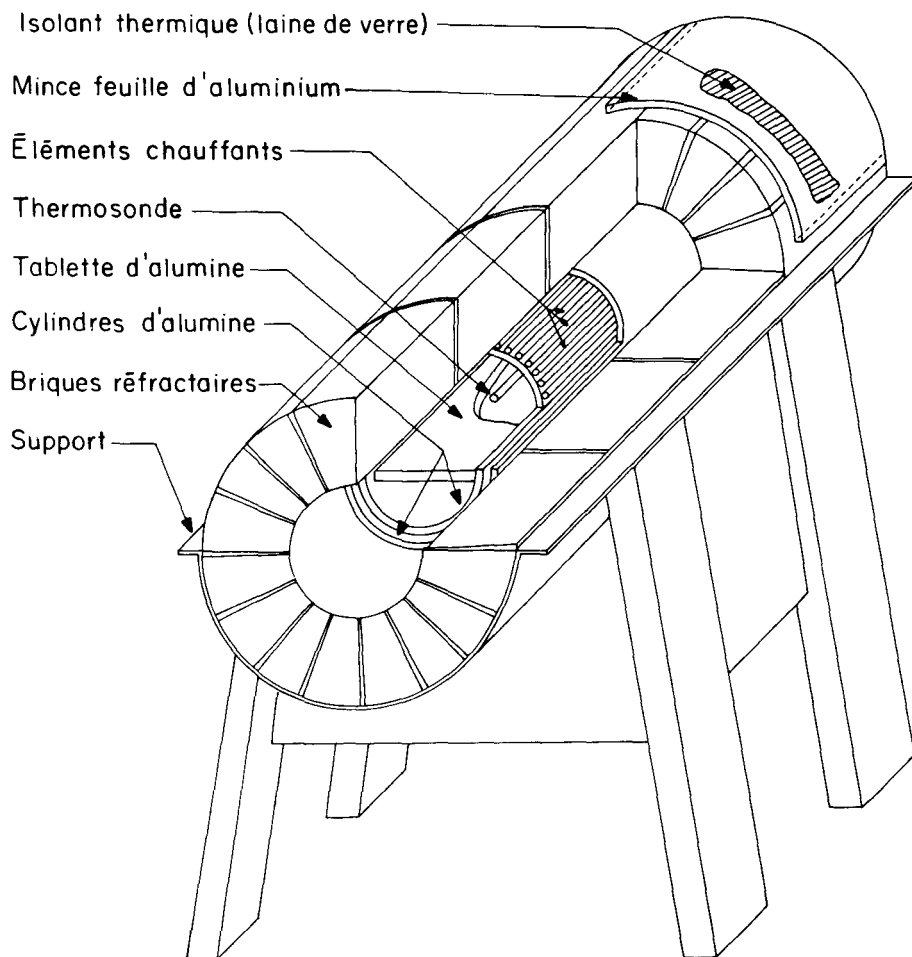


Figure 2
Schéma du four électrique

Le double tube et l'isolant reposent sur un support d'aluminium d'une hauteur de 71 cm qui épouse la forme du four. Une tablette de 11,5 cm de largeur et de 23 cm de longueur permet de recevoir les échantillons; elle est placée au centre des tubes d'alumine de façon à profiter au maximum de l'annulation du champ magnétique terrestre au moyen des bobines d'Helmholtz.

b) Annulation du champ magnétique

Pour obtenir un espace où le champ magnétique pratiquement est nul, on utilise des bobines d'Helmholtz permettant de réduire ou de compenser le champ

magnétique terrestre. Parmi les diverses méthodes utilisées pour éliminer ou réduire le champ magnétique externe (terrestre ou artificiel), les plus communes consistent en l'emploi d'une chambre cubique en mumétal (Patton, 1967) qui coupe la majeure partie du champ ambiant ou d'un champ compensateur produit dans le sens contraire à l'aide de bobines d'Helmholtz de manière que les deux champs magnétiques soient égaux et opposés. Les bobines d'Helmholtz sont constituées d'enroulements de fil montés sur cadre circulaire (Chapman et Bartels, 1940; Scott, 1957), de section carrée (Parry, 1967), (Roy, Robertson et Keeping, 1969) ou polygonale et sont ordinairement groupées par paires. L'espacement entre les bobines d'une même paire est fixé par la géométrie du système, ce dernier étant soumis à la condition d'Helmholtz ($\delta^2 \vec{T} / \delta x^2 = 0$ au centre de la bobine). Dans le cas présent, on a choisi une section carrée dont la construction est plus facile. Le champ suivant l'axe d'une bobine carrée de côté 1 cm comprenant n tours de fil dans lesquels circule un courant de 1 ampère est donné

$$\text{par la formule } \vec{T} = \frac{8 \pi I^2}{10 (1^2 + x^2) (21^2 + x^2)^{3/2}} \text{ oersted.}$$

La condition $\delta^2 \vec{T} / \delta x^2 = 0$ est alors obtenue lorsque $x = 0,544$ l. La séparation nécessaire dans le cas d'une paire de bobines carrées sera donc de 0,544 de la longueur du côté de la bobine carrée (Poitras, 1971).

Comme on le sait, le champ magnétique terrestre \vec{T} peut se décomposer suivant ses composantes verticale Z et horizontale H_{N-S} et H_{E-O} . On peut donc concevoir divers agencements des bobines d'Helmholtz pour obtenir un champ nul dans l'espace occupé par le four électrique. L'annulation du champ \vec{T} peut être obtenu grâce à une seule paire de bobines dont l'axe central est parallèle au champ \vec{T} en produisant un champ $-\vec{T}$. Le système est peu avantageux car il pose de sérieux problèmes d'orientation. On pourrait aussi songer à employer 2 paires de bobines, la première paire ayant un axe central parallèle à la composante verticale qui est de beaucoup la plus intense à Québec et qui prendrait la valeur $-Z$. La seconde aurait un axe parallèle à la composante horizontale H et aurait une valeur $-H$. Un tel système comporte aussi des problèmes d'orientation quoique moins sérieux que précédemment. Il est plus pratique pour effectuer l'annulation du champ magnétique d'employer trois paires de bobines placées orthogonalement de façon à compenser pour chacune des trois composantes du champ magnétique terrestre, i.e. Z , H_{N-S} et H_{E-O} . A Québec, en 1972, les valeurs des différentes composantes sont:

$Z = 56002$ gammas, $H_{N-S} = 14,437$ gammas et $H_{E-O} = 4,896$ gammas (Poitras, 1971; Côté, 1972). Ce système dont la principale restriction est axée sur l'orientation (mutuellement perpendiculaires) relative des différentes paires de bobines est passablement facile à réaliser. C'est celui que l'on a choisi; l'utilisation

avantageuse d'un tel système dans une expérience précédente nécessitant un système analogue a confirmé notre choix.

Les supports de ces bobines sont construits en bois et mesurent respectivement 114, 122 et 177 cm de côté. Leurs faces extérieures sont munies d'une rainure carrée de 1,27 cm et le fil en occupe la moitié. On trouve, en appliquant le facteur d'Helmholtz ayant la valeur 0,544, la distance de séparation entre les bobines d'une même paire: 66,1 61,7 et 57,5 cm. Une étude des détails théoriques et des performances de ce genre de bobines a été effectuée par Poitras (1971). Le conducteur utilisé est un fil de cuivre No: B & S/20 type HF ayant les caractéristiques suivantes: résistance en Ohm par 1000 pieds à 20° C 10,35 Ω , diamètre en millimètre: 0,8118 mm et longueur par livre: 323,4 pieds. Les caractéristiques des paires de bobines sont données en Table 1. Les bobines orientées suivant un même axe sont reliées en série de telle façon que le champ produit ait la même intensité que la composante axiale due au champ terrestre, mais une polarité inverse. Les différentes paires de bobines sont branchées à une source régularisée de 24 volts, pouvant fournir jusqu'à 3 ampères. Des résistances variables dont l'ordre de grandeur est de 250 à 500 ohms ont été utilisées dans le circuit afin de pouvoir commander le courant circulant dans chacune des bobines.

Table 1
Caractéristique des paires de bobines

Axe de la bobine	Nombre de tours	Résistance des paires de bobines (Ω)		Séparation (cm)	Longueur de côté (cm)
Est-Ouest	48	7,20	7,25	66	122
Nord-Sud	48	7,85	7,80	61,7	117
Vertical	100	13,80	13,85	57,5	114

c) Matériaux non magnétiques

Dans la construction, on s'est limité à l'emploi des matériaux suivants: alumine, aluminium, briques réfractaires mortier, amiante, platine et nichrome. Ce dernier matériau possède une aimantation plus prononcée que les autres. Le nichrome (80 % Ni et 20 % Cr) est utilisé comme élément de chauffage. Un alliage de nichrome peut être plus ou moins aimanté mais la valeur moyenne du moment magnétique par centimètre de longueur est de $1,1 \cdot 10^{-8}$ u. é. m. cgs. Si l'on place un échantillon à une distance de d cm d'une rangée de fil, le champ magnétique maximum que ce fil peut créer dans l'échantillon est donné par la

$$\text{formule } \vec{T} = \frac{2 m l d}{(d^2 + l^2)^2}$$

où d = distance de l'échantillon (cm)

m = moment par centimètre de fil

l = longueur du fil en centimètre

On obtient alors à l'endroit où se situent les échantillons sur la tablette d'alumine un champ infime de l'ordre de 10^{-6} ørsted et on peut considérer que ce champ n'aura pas une grande influence sur les échantillons. Le four a été placé exactement au centre des bobines d'Helmholtz afin de profiter au maximum de l'annulation du champ que procurent celles-ci. En effet, on a vu que le champ est en principe nul au centre et qu'il augmente en s'en éloignant de sorte que les échantillons doivent être disposés le plus possible au centre du four. On est parvenu à éliminer entièrement l'emploi du laiton commercial dont l'intensité (moment magnétique/volume) est plus grande (de l'ordre de $2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-5}$ u. é. m. cgs) que celle du nichrome.

d) Température d'au moins 700°C

Il faut déterminer la longueur et la grosseur du fil de nichrome qui va permettre d'obtenir une température maximale de 700°C , tout en s'alimentant sur le circuit standard du laboratoire. On doit aussi tenir compte du fait que l'élément de chauffage doit avoir une durée de vie assez longue, car la technique de désaimantation thermique nécessite un grand nombre d'heures de chauffage. La publication de Roy, Sanders et Reynolds (1972) et les tables publiées par divers fabricants d'éléments chauffants démontrent qu'il faut utiliser du fil de nichrome, chromel A (80 % Ni, 20 % Cr) de calibre No: 11, ayant 0,2305 cm de diamètre et une résistance de 0,078 ohm par pied. Long de 29 mètres, il a une résistance totale de 7,56 Ohm à 20°C . En branchant cette résistance sur le circuit d'alimentation de 110 V. A. C., il circule un courant (60 Hertz) d'environ 12,6 Ampère. Grâce à un transformateur, on augmente le voltage à 150 volts et plus, et on obtient une puissance de 1700 Watt approximativement ou davantage. Il faut tenir compte de cette valeur dans le choix du régulateur de température. Le point de fusion de l'alliage du fil est à environ 1350° à 1400°C .

e) Uniformité de la température

Du fait que l'élément de chauffage est encastré dans une masse d'alumine dont la conductivité thermique est bonne, la différence de température entre l'élément chauffant et le four demeure en principe petite. Cette masse d'alumine chauffée est une source de chaleur plus uniforme que ne le serait un élément expose; elle permet ainsi d'obtenir une température plus uniforme à l'intérieur du four. L'obtention d'une température uniforme permet de diminuer les possibilités d'erreurs lors de la détermination de l'intensité et de la direction d'un champ fossile. Le taux de montée de la température débute à $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, baisse à $1^{\circ}/\text{min}$ aux environs de 300°C et à $0,25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ à 450°C et plus. D'autre part, la chute de température peut aller jusqu'à $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (à 500°C et plus, bonnet enlevé) et descendre jusqu'à $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ seulement à moins de 100°C .

f) Contrôle et mesure de la température

La température est commandée automatiquement au moyen d'un régulateur de chauffage. Le régulateur utilisé a été conçu et construit au Geophysical La-

Table 2
Thermo-sonde en platine
Résistance vs température

a)				b)					
T	R	T	R	T	R	T	G	T	G
0	100,0	280	206,8	800	380,7	100°	130	600°	637
10	104,0	300	214,1	820	386,7	120°	292	620°	653
20	108,0	320	221,3	840	392,7	140°	308	640°	666
30	111,9	340	228,5	860	398,7	160°	323	660°	679
32,38	112,9	360	235,6	880	404,6	180°	339	680°	691
40	115,8	380	242,7	900	410,6	200°	352	700°	706
50	119,7	400	249,7	920	416,6	220°	369	720°	717
60	123,7	420	256,7	940	422,1	240°	383	740°	730
70	127,6	440	263,7	960	427,8	260°	396	760°	742
80	131,5	460	270,6	980	433,6	280°	421	780°	757
90	135,3	480	277,4	1000	459,1	300°	436	800°	769
97,77	138,3	500	284,2			320°	451	820°	780
100	139,2	520	291,0			340°	464	840°	792
120	146,9	540	297,7			360°	480	860°	804
140	154,6	560	304,4			380°	494	880°	814
160	162,2	580	311,0			400°	509	900°	827
180	169,7	600	316,5			420°	522	920°	837
200	177,2	620	324,1			440°	537	940°	850
220	184,7	640	330,5			460°	551	960°	861
240	192,1	660	337,0			480°	564	980°	872
260	199,5	680	343,4			500°	579	1000°	883
		700	349,7			520°	592		
		720	356,0			540°	605		
		740	362,2			560°	613		
		760	368,4			580°	627		
		780	374,6						

T Température en °C

R Résistance en Ohm

G Graduations (lecture sur le cadran de commande)

linéaire. La linéarité de la résistance de la sonde facilite l'adaptation du régulateur de température à cette dernière. La résistance en platine de la thermo-sonde est continuellement comparée à celle qui a été déterminée d'après l'indicateur du régulateur. Lorsque les valeurs de ces deux résistances approchent l'une de l'autre, la puissance diminue graduellement jusqu'à ce que les deux résistances soient égales. Un interrupteur et démarreur automatique permettront de maintenir la température au voisinage d'une valeur choisie et le chauffage à l'isotherme sélectionnée a lieu en l'absence d'un opérateur. La thermo-sonde a été calibrée à 2°C près au moyen d'un thermocouple de platine et de platine à

13 % de rhodium. L'échelle des valeurs au thermostat est graduée en températures ($^{\circ}\text{C}$) (voir tableau 2b).

III. Technique de désaimantation

Il est très difficile d'isoler de l'aimantation naturelle mesurée l'aimantation originelle sur laquelle on désire obtenir de plus amples renseignements en effaçant progressivement d'autres aimantations secondaires. On est alors en présence de problèmes compliqués dont un rôle essentiel est joué par les facteurs suivants: propriétés des minéraux magnétiques, divers mécanismes d'aimantation des roches et des terres cuites, modifications minéralogiques subies par les masses magnétiques au cours des temps géologiques soit spontanées soit par actions physiques ou chimiques soit encore par les modifications qu'ils subissent en laboratoire lors des recuits que peuvent comporter les essais.

Toutes modifications des aimantations originelles, si elles sont de grande importance lorsqu'on s'intéresse à la mesure de l'intensité du champ, le sont aussi en ce qui concerne la direction de ce même champ et au point tel qu'on a pu imaginer à partir de certaines de ces aimantations des mécanismes d'auto-inversion progressive du sens de l'aimantation. Ainsi donc, pour déterminer à l'aide d'une roche ou de terres cuites l'intensité et la direction d'un champ originel, il faut d'abord étudier sa stabilité minéralogique et établir l'importance qu'a sur cette roche l'acquisition d'aimantation autre que l'aimantation thermo-rémanente. Pour cela, il faut faire subir aux échantillons une série de tests en particulier les tests de stabilité d'échantillons permettant d'évaluer la validité des données recueillies à l'aide de la méthode de mesure.

1. Méthode d'utilisation du four

Il existe deux façons de procéder; l'une exigeant l'annulation du champ magnétique ambiant (Roy, Opdyke et Irving, 1967) et l'autre, plus laborieuse, n'exigeant pas l'annulation de ce champ (Thellier, 1938).

a) Méthode en champ nul

Tout d'abord, on chauffe la roche jusqu'à 100°C pour permettre le nettoyage et après refroidissement en champ nul, on mesure le moment magnétique résiduel à cette température, i. e. \vec{M} (670°C , \vec{T}_0 , 100°C). On continue d'effectuer des chauffages et refroidissements successifs à intervalles de température égaux (e. g. tous les 100°C) jusqu'au point de Curie Θ_c ($\approx 670^{\circ}\text{C}$ pour l'hématite); de cette façon on obtient une série de moments magnétiques et de directions correspondant à chacune des températures. Après avoir étudié la disparition en champ nul de l'aimantation naturelle, le recuit ayant atteint 670°C , il est alors loisible de provoquer une aimantation thermo-rémanente (A. T. R.) totale de champ connu et de tracer sa courbe de désaimantation (Figure 4). Il est important de

noter le moment magnétique acquis par la roche jusqu'à la température de la pièce et ceci permet de déterminer la stabilité minéralogique de la roche. Si la valeur des aimantations thermorémanentes est différente pour les deux aimantations provoquées dans le champ connu, les résultats obtenus à partir de cet échantillon ne sont pas valables.

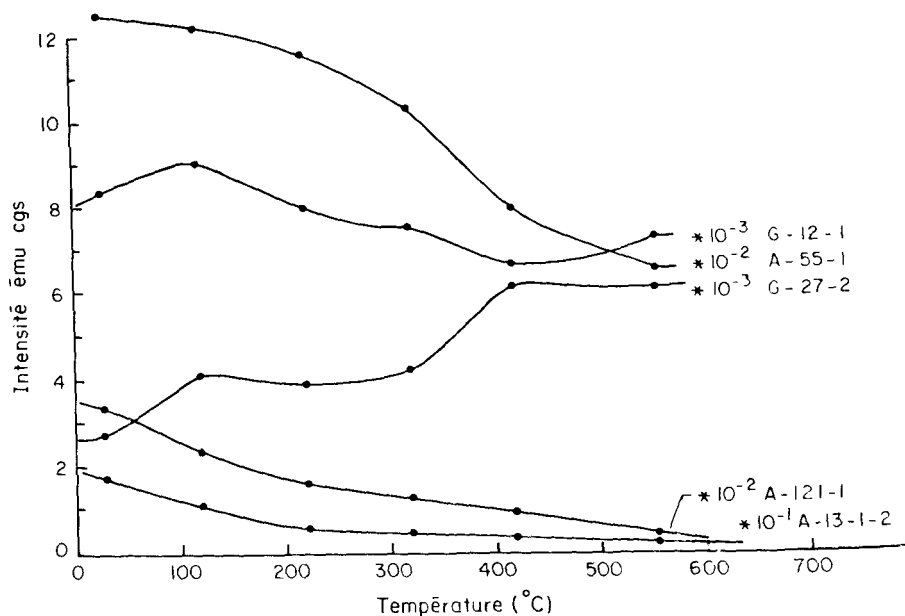


Figure 4

Courbes de désaimantation de formations de fer (itabirites magnétiques), du secteur sud de la fosse du Labrador (étude paléomagnétique en cours); Seguin 1973).
Exemple: L'échantillon G-12-1, à une température de 550° C.
possède une intensité magnétique de $7,2 \times 10^{-3}$ u. é. m. cgs

b) Méthode dans le champ connu de laboratoire

La méthode n'exigeant pas l'annulation du champ ambiant est ingénieuse mais elle requiert beaucoup de manipulations. Après avoir déterminé le moment magnétique naturel (\vec{M}) à 20° C, (moment qui ne sert pas directement à la détermination de l'intensité), on chauffe la roche à 100° C, pour le nettoyage, dans une position connue à l'intérieur du four. Après refroidissement dans cette même position durant une période de temps assez longue pour permettre à la roche d'atteindre la température de la pièce, on mesure le moment (\vec{M}_1) de l'échantillon. D'après les lois de la thermorémanence, ce moment est la résultante de deux composantes: a) le moment initial \vec{M}_0 acquis dans le champ \vec{T}_0 , mais limité à

100° C, i. e. \vec{M}_0 (670° C, \vec{T}_0 , 100° C), (moment qu'aurait acquis l'échantillon à l'origine si au cours du refroidissement on avait pu supprimer le champ terrestre à partir de 100° C) et le moment (\vec{M}) dans le champ \vec{T} du laboratoire entre 100° et 20° C, i. e. \vec{M} (670° C, \vec{T} , 20° C). On chauffe à nouveau la roche à 100° C dans le champ terrestre mais dans une position inversée par rapport à la première. En pratique, on choisit trois directions rectangulaires xx' , yy' , zz' perpendiculaires aux faces de l'échantillon et on fait faire à cet échantillon une rotation à 180° pour le deuxième essai. Après un refroidissement à 20° C dans le champ terrestre, on mesure le nouveau moment \vec{M}_2 comme on l'a fait pour \vec{M}_1 . Le moment \vec{M}_2 est maintenant la résultante du moment ancien restant, \vec{M}_0 (670° C, \vec{T}_0 , 20° C), qu'un nouveau chauffage n'a pas changé et du moment \vec{M} (100° C, \vec{T} , 20° C). La demi-somme des vecteurs \vec{M}_1 et \vec{M}_2 donne \vec{M} (670° C, \vec{T}_0 , 100° C) et leur demi-différence représente \vec{M} (100° C, \vec{T} , 20° C), soit le nouveau moment thermorémanent. On fait la demi-somme algébrique des deux composantes \vec{M}_1 et \vec{M}_2 suivant chacun des trois axes, ce qui donne les composantes du premier vecteur; la demi-différence donne le second vecteur.

On continue d'effectuer la même opération pour des intervalles de température choisis jusqu'au point de Curie (Θ_c) en calculant pour chaque température le moment ancien et le moment thermorémanent nouveau, puis, à la fin on fait le test de stabilité minéralogique.

2. Calcul de l'intensité et de la direction du champ

Quelle que soit la méthode, on peut calculer pour chaque intervalle de température

$$\frac{\vec{T}_0}{\vec{T}} = \frac{\vec{M}_0(670^\circ \text{ C}, \vec{T}_0, \Theta)}{\vec{M}(670^\circ \text{ C}, \vec{T}, \Theta)}$$

et obtenir ainsi plusieurs valeurs de \vec{T}_0 . L'accord entre les valeurs obtenues ne peut exister que si l'aimantation naturelle est une thermorémanence unique, c'est-à-dire acquise par refroidissement dans un champ constant en direction et en intensité, ce que l'on présume être le cas pour les échantillons choisis. Ainsi donc, si, l'A. T. R. initiale était troublée par une aimantation naturelle isotherme importante (due par exemple à la foudre) ou par une A. T. R. secondaire, on serait alors prévenu par le désaccord des valeurs de \vec{T}_0 correspondant aux intervalles successifs de température. Il est aussi évident que les valeurs de \vec{T}_0 obtenues pour différents intervalles de la composition des minéraux magnétiques

présents dans la roche sont modifiées au fur et à mesure que s'élève la température de recuit.

On peut à partir des résultats obtenus tracer une courbe qui représente la variation du moment magnétique en fonction de la température. Grâce à la première méthode on obtient deux courbes de désaimantation que l'on peut tracer sur le même graphique. On peut essayer de superposer la courbe de désaimantation obtenue par refroidissement dans le champ du laboratoire à celles de l'aimantation ancienne; il faut alors multiplier le moment magnétique par une constante k afin d'obtenir la superposition des deux courbes. Ainsi, on obtient l'intensité du champ originel en multipliant la valeur du champ du laboratoire par la constante k , d'où $\vec{T}_0 = k\vec{T}$.

Par la seconde méthode le procédé est le même mais il faut tenir compte que par cette méthode on obtient une courbe de désaimantation et une courbe d'aimantation (d'où la différence avec le procédé précédent). Pour obtenir une comparaison des courbes, il s'agit de renverser la courbe d'aimantation.

Conclusion

L'étude de l'aimantation des roches permet de découvrir certaines propriétés de celles-ci, permettant ainsi de retracer l'évolution de l'aimantation des roches et les variations du champ terrestre. Le traitement thermique des roches réalisé à l'aide d'un four de conception spéciale permet de tracer les courbes d'aimantation et de désaimantation et ainsi d'obtenir l'intensité et l'orientation d'un champ magnétique fossile.

Les manipulations pour l'obtention de résultats valables sont assez laborieuses et lentes. La qualité de l'équipement utilisé pour le traitement thermique est confirmée en traçant la courbe de désaimantation d'un échantillon, soit la décroissance régulière du moment magnétique jusqu'à zéro en fonction de l'augmentation de la température; cette caractéristique témoigne de l'efficacité de la désaimantation thermique le champ devenant quasi nul. Il serait possible d'obtenir un champ nul plus stable à l'intérieur du four en plaçant le système dans une chambre cubique en mumétal permettant une diminution d'un champ de l'ordre de $5 \text{ à } 6 \cdot 10^4$ gammas à environ 25 à 35 gammas. On pourrait aussi améliorer le système de commande du courant dans les bobines d'Helmholtz à l'aide d'un système de solénoïdes à noyau saturable placé au centre de l'ensemble (Roy, Robertson et Keeping, 1969). De tels solénoïdes réagissent facilement et rapidement à une variation du champ magnétique ambiant et lorsqu'ils font partie d'un système de contre-réaction, ils permettent d'effectuer des variations de courant dans les bobines d'Helmholtz contrebalançant les changements de champ magnétique.

Bibliographie

- Chapman, S., et Bartels, J. (1951): *Geomagnetism*, Clarendon Press, Oxford, p. 83.
- Côté, M. A. (1972): Conception et réalisation d'un démagnétiseur à courant alternatif. Thèse de Baccalauréat ès Sciences Appliquées, Génie physique, Université Laval, 29 p., Avril.
- Hadidiacos, C. G. (1967): Solid state temperature controller. Geological Note, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Washington, D. C., 20008, USA.
- Irving, E., Robertson, W. A., Stott, P. M., Tarling, D. H. et Ward, M. A. (1961): Treatment of partially stable sedimentary rocks showing distribution of direction of magnetization. *Journ. Geophys. Res.*, Vol. 66, p. 1927—1933.
- Irving, E. (1964): *Paleomagnetism and its Application to Geological and Geophysical Problems*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 399 p.
- Lambert, G. (1973): Conception et construction d'une fournaise de désaimantation. Thèse de Baccalauréat ès Sciences Appliquées, Génie physique, Université Laval, 28 p., Avril.
- Néel, L. (1955): Some theoretical aspects of rock magnetism. *Phil. Mag. Supp. Adv. Phys.*, Vol. 4, p. 191—243.
- Parry, J. H. (1967): Helmholtz coils and coil design. Dans *methods in paleomagnetism*, Elsevier, Amsterdam, p. 551—567.
- Patton, B. J. (1967): Magnetic shielding. Dans *Methods in paleomagnetism*, Elsevier, Amsterdam, p. 568—588.
- Poitras, A. (1971): Etude sur l'annulation du champ magnétique terrestre. Thèse de Baccalauréat ès Sciences Appliquées, Génie physique, Université Laval, 23 p. Avril.
- Roy, J. L., Opdyke, N. D., et Irving, E. (1967): Further paleomagnetic results from the Bloomsberg formation. *Journ. Geophys. Res.*, Vol. 72, No: 20, p. 5075—5086.
- Roy, J. L., Robertson, W. A., et Keeping, C. (1969): Magnetic „field free“ spaces for paleomagnetism, rock magnetism and other studies. *Can. Journ. Earth Sci.*, Vol. 6, p. 1312—1316.
- Roy, J. L., Sanders, E., et Reynolds, J. (1972): Un four électrique pour l'étude des propriétés magnétiques des roches. *Publications of the Earth Physics Branch*, Vol. 42, No. 8, p. 229—237.
- Runcorn, S. K. (editor, 1962): *Continental drift*. International Geophysics Series, Vol. 3, Academic Press, New York and London, p. 1—40.
- Schwarz, E. J. (1966): Magnetization of precambrian sulphide deposits and wallrocks from the Noranda district, Canada. *Geophysics*, Vol. 31, No. 4, p. 797—803.
- Scott, G. G. (1957): Compensation of the Earth's magnetic field. *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 28, No. 4, Avril p. 270—273.
- Seguin, M. K. (1971): *La géophysique et les propriétés physiques des roches*. Les Presses de l'Université Laval, 562 pp.
- Thellier, E. (1938): Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. *Ann. de l'Institut de Phys. du Globe, Univ. Paris*. Vol. 16, p. 157—302.
- Thellier, E. et Thellier, O. (1959): Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géographique. *Ann. Géophys.*, Vol. 15, p. 285—376.